

NTP 291: Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit



Modèles de vulnérabilité pour population en accidents majeurs: méthode Probit
Vulnerability models for population in major accidents: Probit method

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactor:

Emilio Turmo Sierra
Ingeniero Industrial

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

El análisis de consecuencias de accidentes mayores se puede realizar mediante modelos de cálculo que intentan predecir qué va a ocurrir ante un determinado incidente. Así se han ideado modelos de simulación de escapes de sustancias tóxicas e inflamables, modelos de dispersión de estas sustancias y modelos de explosiones e incendios que nos dan los datos necesarios para evaluar los daños a personas y edificios mediante los llamados modelos de vulnerabilidad.

Introducción

Los modelos de vulnerabilidad sirven para determinar las consecuencias a las personas y edificios expuestos a una determinada carga térmica, tóxica o de sobrepresión. Estos modelos se basan en experiencias realizadas con animales en laboratorio o en estudios de las muertes o lesiones de accidentes ocurridos.

Entre los modelos de vulnerabilidad se destaca el método «Probit», que es un método estadístico que nos da una relación entre la función de probabilidad y una determinada carga de exposición a un riesgo.

Este documento se centra fundamentalmente sobre la vulnerabilidad de personas.

Criterios de vulnerabilidad de personas según la legislación vigente

La Directriz Básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico (B.O.E. 62-1991) establece unos valores umbral que sirven para delimitar las zonas potencialmente afectadas por un accidente mayor y para las cuales se debe tener previsto el llamado Plan de Emergencia Exterior.

Zona de Intervención

Es aquella en la que las consecuencias de los accidentes producen un nivel de daños que justifica la aplicación inmediata de medidas de protección.

Zona de Alerta

Es aquella en la que las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, aunque perceptibles por la población, no justifican la intervención, excepto para los grupos críticos, que serán definidos por el responsable del Grupo Sanitario para cada caso concreto.

Según la normativa, los valores umbrales que deberán adoptarse para la delimitación de la Zona de Intervención son los que a continuación se señalan:

- Un valor local integrado del **Impulso**, debido a la onda de presión, de 150 mbar.s.
- Una **Sobrepresión** local estática de la onda de presión de 125 mbar.
- El **Alcance Máximo de Projectiles** con un impulso superior a 10 mbar.s en una cuantía del 95%, producidos por explosión o estallido de continentes (depósitos a presión, tanques atmosféricos, conducciones y cualquier otro tipo de instalaciones susceptibles de originar proyectiles primarios).

- Un **Flujo de Radiación Térmica** superior a 5 kW/m² independientemente del espectro de emisión con un tiempo máximo de exposición de 3 minutos.
- Para **Concentraciones de Sustancias Tóxicas en Aire** superiores al equivalente al Límite Inmediatamente Peligroso para la Vida y la Salud (IPVS). Esta concentración representa el máximo nivel del que en un plazo de 30 minutos, un sujeto expuesto puede escapar sin síntomas graves ni efectos irreversibles para la salud. Estos valores se dispondrán en una Guía Técnica que debe complementar la Directriz Básica, a publicar en el B.O.E. Mientras tanto se recomienda utilizar los valores indicados por ACGH y publicados en la NTP 293
- Las **Variables para el Medio Ambiente** establecidas en el Adenda 1 de la Directriz Básica.

Asimismo, para delimitación de la Zona de Alerta se considerarán los siguientes valores umbrales o circunstancias:

- Un valor local integrado del **Impulso**, debido a la onda de presión, de 100 mbar.s.
- Una **Sobrepresión** local estática de la onda de presión de 50 mbar.
- El **Alcance Máximo de proyectiles** con un impulso superior a 10 mbar.s en una cuantía del 99,9%, producidos por explosión o estallido de continentes.
- Un **Flujo de Radiación Térmica** de 3 kW/m².
- Para **Concentraciones de Sustancias Tóxicas en Aire** y en función del producto involucrado en el accidente, se tendrán en cuenta los criterios que se expondrán en la Guía Técnica de la Directriz Básica.
- **Contaminación o Alteración del Medio Ambiente** que represente un peligro para la flora y fauna, o una degradación inadmisible del entorno, según los criterios señalados en el Artículo 2 de la Directriz Básica.

Método Probit

En este método se parte de una manifestación física de un incidente (por ejemplo, la concentración tóxica y tiempo de exposición en una cierta área geográfica) y nos da como resultado una previsión de los daños a las personas expuestas al incidente (es decir, número de heridos, número de víctimas, etc.).

La fórmula empleada para este modelo de vulnerabilidad se basa en una función matemática lineal de carácter empírico extraída de estudios experimentales:

$$Pr = a + b \ln V (1)$$

Donde:

Pr = «Probit» o función de probabilidad de daño sobre la población expuesta.

a = Constante dependiente del tipo de lesión y tipo de carga de exposición.

b = Constante dependiente del tipo de carga de exposición.

V = Variable que representa la carga de exposición.

El valor «probit» permite determinar el porcentaje de la población expuesta que se verá afectada a un determinado nivel de lesiones o por muerte a causa de una carga de exposición determinada (tabla 1).

Tabla 1: Equivalencia entre valores "probit" y porcentaje de población afectada

Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%
0	0	3,72	10	4,16	20	4,48	30	4,75	40	5,00	50	5,25	60	5,52	70	5,84	80	6,28	90	7,33	99,0
2,67	1	3,77	11	4,19	21	4,50	31	4,77	41	5,03	51	5,28	61	5,55	71	5,88	81	6,34	91	7,37	99,1
2,95	2	3,82	12	4,23	22	4,53	32	4,80	42	5,05	52	5,31	62	5,58	72	5,92	82	6,41	92	7,41	99,2
3,12	3	3,87	13	4,26	23	4,56	33	4,82	43	5,08	53	5,33	63	5,61	73	5,95	83	6,48	93	7,46	99,3
3,25	4	3,92	14	4,29	24	4,59	34	4,85	44	5,10	54	5,36	64	5,64	74	5,99	84	6,55	94	7,51	99,4
3,36	5	3,96	15	4,33	25	4,61	35	4,87	45	5,13	55	5,39	65	5,67	75	6,04	85	6,64	95	7,58	99,5
3,45	6	4,01	16	4,36	26	4,64	36	4,90	46	5,15	56	5,41	66	5,71	76	6,08	86	6,75	96	7,65	99,6
3,52	7	4,05	17	4,39	27	4,67	37	4,92	47	5,18	57	5,44	67	5,74	77	6,13	87	6,88	97	7,75	99,7
3,59	8	4,08	18	4,42	28	4,69	38	4,95	48	5,20	58	5,47	68	5,77	78	6,18	88	7,05	98	7,88	99,8
3,66	9	4,12	19	4,45	29	4,72	39	4,97	49	5,23	59	5,50	69	5,81	79	6,23	89	7,33	99	8,09	99,9

La variable dependiente Pr se ha establecido como una variable aleatoria según una distribución estadística normal con un valor medio de 5 y una desviación tipo (desviación estándar) de 1, lo cual significa que a un porcentaje del 50% corresponde un valor del «probit» = 5.

Este método se puede emplear para determinar el porcentaje de personas afectadas por intoxicación, por radiación térmica y por sobrepresión.

Método «Probit» de vulnerabilidad a la inhalación de sustancias tóxicas

Para determinar el porcentaje de personas afectadas por intoxicación ocasionada por inhalación de una sustancia tóxica se utiliza la función (1) sustituyendo el valor V por la expresión:

$$V = c^n t$$

Siendo:

c = Concentración (ppm = partes por millón).

t = Tiempo de exposición (minutos).

n = Exponente (sin dimensiones 0,6 - 3).

Con lo que:

$$Pr = a + b \ln (c^n t)$$

Si la concentración se diera en mg/m³ variarían los valores de las constantes de la expresión indicada y sería necesario disponer de ellas o transformaríamos esa concentración a ppm mediante la fórmula:

$$C_{ppm} = C_{mg/m^3} \frac{22,4 \cdot T_a}{M \cdot 273}$$

Siendo:

T_a = Temperatura ambiente absoluta, K.

M = Peso molecular del contaminante.

22,4 = Volumen molar en litros de un gas a 0 °C y 1 atm (760 Torr).

Para las sustancias muy tóxicas y más comunes se dispone en la bibliografía especializada de los valores de a, b y n de la ecuación «Probit» relativas a intoxicaciones letales (tabla 2).

Tabla 2: Constantes de toxicidad letal para la ecuación "probit"

SUSTANCIA	a (ppm)	b (ppm)	n (min)
ACRILONITRILO	- 29,42	3,008	1,43
ACROLEINA	- 9,931	2,049	1
AMONIACO	- 35,9	1,85	2
BENCENO	- 109,78	5,3	2
BROMO	- 9,04	0,92	2
BROMURO DE METILO	- 56,81	5,27	1,00
CIANURO DE HIDROGENO	- 29,42	3,008	1,43
CORO	- 8,29	0,92	2
CORURO DE HIDROGENO	- 16,85	2,00	1,00
DIOXIDO DE AZUFRE	- 15,67	2,10	1,00
DIOXIDO DE NITROGENO	- 13,79	1,4	2
FLUORURO DE HIDROGENO	- 35,87	3,354	1,00
FORMALDEHIDO	- 12,24	1,3	2
FOSGENO	- 19,27	3,686	1
ISOCIANATO DE METILO	- 5,642	1,637	0,653
MONÓXIDO DE CARBONO	- 37,98	3,7	1
OXIDO DE PROPILENO	- 7,415	0,509	2,00
SULFURO DE HIDROGENO	- 31,42	3,008	1,43
TETRACLORURO DE CARBONO	- 6,29	0,408	2,50
TOLUENO	- 6,794	0,408	2,50

La ecuación probit no es aplicable para concentraciones relativamente bajas y tiempos de exposición muy prolongados, cuyos métodos de valoración serían otros. Su uso está restringido al análisis de consecuencias agudas e inmediatas.

Debe tenerse en cuenta que, dada una cierta concentración tóxica en una zona poblada, la población que efectivamente está en riesgo es la ubicada en exteriores. Los individuos en lugares cerrados se pueden considerar al abrigo de los efectos letales excepto en el caso de una duración excepcional del impacto tóxico en la zona.

Un ejemplo lo tenemos en la siguiente ecuación «probit» propuesta por Withers y Lees (1985) para obtener el porcentaje de muertes en una población con nivel de actividad normal que está expuesta a cloro:

$$Pr = -8,29 + 0,92 \ln (c^2 t)$$

Donde:

c = Concentración de cloro, ppm.

t = Tiempo, min.

Ejemplo

Determinar el porcentaje probable de muertes en una exposición de 20 minutos a 400 ppm de cloro a 20 °C y a la presión atmosférica.

$$Pr = - 8,29 + 0,92 \ln (400^2 \cdot 20) = 5,49$$

Buscando el valor 5,49 en la tabla 1 se encuentra que el porcentaje afectado es el 69%.

En caso de mezclas de gases no se dispone de los parámetros a introducir en la ecuación «probit», por lo que hasta el momento el método sólo sirve para las sustancias puras referenciadas.

Método «Probit» de vulnerabilidad a radiaciones térmicas

Se emplea para determinar el porcentaje de personas afectadas por los efectos de las radiaciones térmicas en función de la intensidad de irradiación recibida y del tiempo de exposición (dosis de radiación calorífica recibida).

En el caso de fugas de líquidos y gases inflamables y con una ignición inmediata, se podrá generar un charco ardiendo, una explosión BLEVE o un chorro con llamarada. Las lesiones ocasionadas serán causadas principalmente por radiaciones térmicas.

Si el gas no se enciende inmediatamente, se dispersará en la atmósfera. Si la nube de gas formada se encuentra con un foco de ignición en sus proximidades, se supone que cualquier persona presente dentro de la nube de gas ardiendo morirá a consecuencia de quemaduras y asfixia. En la zona externa a la nube de gas, aunque la duración de la radiación térmica generalmente será breve, los daños estarán en función de la distancia y habrán de ser evaluados en cada caso.

La institución holandesa TNO (Organización holandesa para la investigación científica) presenta las ecuaciones «probit» siguientes:

- **Quemaduras mortales (protegidos con ropas):**

$$Pr = -37,23 + 2,56 \ln (t I^{4/3})$$

- **Quemaduras mortales (sin protección):**

$$Pr = -36,38 + 2,56 \ln (t I^{4/3})$$

- **Quemaduras de 2º grado:**

$$Pr = -43,14 + 3,0188 \ln (t I^{4/3})$$

- **Quemaduras de 1er. grado:**

$$Pr = -39,83 + 3,0186 \ln (t I^{4/3})$$

Donde:

t = Tiempo efectivo de exposición en segundos.

I = Intensidad de irradiación en W/m².

En las fórmulas anteriores se ha supuesto que las lesiones ocasionadas se reducen por el factor 7 si se va protegido con ropa. En otras palabras, un porcentaje del 1% en un determinado grado de lesión en personas que utilizan ropas equivale a un 7% en personas que no van protegidas con ropas.

Otra ecuación «Probit» desarrollada por Eisenberg et al. para evaluar el porcentaje de mortalidad por irradiación térmica es la siguiente:

$$Pr = -14,9 + 2,56 \ln \left(\frac{t I^{4/3}}{10^4} \right)$$

Donde:

t = Tiempo de exposición en segundos.

I = Intensidad de irradiación térmica en W/m².

Estas ecuaciones son útiles para incendios de tipo fogonazo (flash fire) de corta duración, como en el incendio de la bola de fuego ocasionada por una BLEVE y que no da tiempo a escapar, y también para incendios de derrames que forman un charco en llamas en los cuales se intenta escapar y buscar protección detrás de obstáculos. En este último caso se determina el tiempo de exposición efectivo mediante la expresión propuesta por TNO:

$$t_{ef} = t_r + \frac{3}{5} \cdot \frac{x_0}{\mu} \left[1 - \left(1 + \frac{\mu}{x_0} \cdot t_v \right)^{-5/3} \right]$$

Donde:

t_{ef} = Tiempo de exposición efectivo (s).

t_r = Tiempo de reacción (5 segundos).

x_0 = Distancia al centro del incendio (m).

μ = Velocidad de escape de una persona (m/s).

t_v = Tiempo en llegar a la distancia en la que la intensidad de irradiación sea 1 kW/m² (S).

Ejemplos

1. Calcular la función «probit» y la probabilidad de lesiones mortales que corresponden a una exposición de intensidad de radiación 16,5 kW/m² durante 10 segundos.

Solución:

Empleando la ecuación de TNO -ref. (4) de la Bibliografía- $Pr = -36,38 + 2,56 \ln(t I^{4/3})$:

$$Pr = -36,38 + 2,56 \ln(10 \cdot 16500^{4/3}) = 2,66$$

A un «probit» de 2,66 mediante la tabla de transformación le corresponde un porcentaje de mortalidad del 1 %.

2. Determinar el flujo térmico necesario que causaría un 50% de víctimas en 10 y 100 segundos respectivamente.

Solución:

Empleando la fórmula de Eisenberg -ref. (1) de la Bibliografía- y despejando I tenemos:

$$I = \left[\frac{10^4}{t} e^{\frac{Pr+14,9}{2,56}} \right]^{3/4}$$

Según tabla de transformación de «probits» a porcentaje, a un 50% le corresponde un «probit» de 5, y para $t = 10$ s:

$$I = \left[\frac{10^4}{10} e^{\frac{5+14,9}{2,56}} \right]^{3/4} = 60350 \text{ W/m}^2 = 60,53 \text{ kW/m}^2$$

Para $t = 100$ s:

$$I = \left[\frac{10^4}{100} e^{\frac{5+14,9}{2,56}} \right]^{3/4} = 10763 \text{ W/m}^2 = 10,76 \text{ kW/m}^2$$

Método Probit de vulnerabilidad a explosiones

Los modelos de consecuencias de explosiones predicen el impacto de la sobrepresión originada por la explosión y la proyección de fragmentos volantes sobre las personas y objetos.

Al considerar las consecuencias sobre las personas se debe hacer distinción entre consecuencias directas e indirectas de una explosión. Entre las primeras están las lesiones de los pulmones y los tímpanos. Entre las segundas se encuentran las lesiones ocasionadas por proyección de fragmentos y por impacto del cuerpo contra obstáculos.

Las ecuaciones «probit» para estas consecuencias se han tomado de Eisenberg et al. (1975) y se desglosan a continuación:

Muerte por lesiones pulmonares

La ecuación «probit» para determinar el porcentaje de muertes por hemorragia pulmonar es la siguiente:

$$Pr = -77,1 + 6,91 \ln P$$

P = sobrepresión máxima (N/m²)

Rotura de tímpano

El porcentaje de afectados por rotura de tímpano se determina por la ecuación:

$$Pr = -15,6 + 1,93 \ln P$$

P = sobrepresión máxima (N/m²)

Muerte por impacto del cuerpo

El porcentaje de muertes por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos se determina por la ecuación:

$$Pr = -46,1 + 4,82 \ln J$$

Donde J = impulso originado por la sobrepresión durante el tiempo de actuación (N · s/m²).

Lesiones por impacto del cuerpo

El porcentaje de lesionados por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos se determina por la ecuación:

$$Pr = 39,1 + 4,45 \ln J$$

Donde J = impulso (N · s/m²).

A continuación se indican unos valores de referencia de consecuencias sobre edificios según la sobrepresión alcanzada:

- Daños importantes en edificios (casi completa destrucción): 0,35 bar.
- Daños reparables en edificios: 0,10 bar.
- Rotura de cristales en edificios: 0,05 bar.

Aunque existen modelos de vulnerabilidad para impacto de fragmentos metálicos de los recipientes, proyectados en una explosión, no se han considerado suficientemente representativos y fiables para incluirlos. Cabe destacar que los fragmentos de considerable tamaño pueden alcanzar distancias incluso superiores a 1 km.

TNO indica que los proyectiles con una energía cinética de 100 julios pueden ocasionar víctimas mortales.

Nota

Correspondencia entre unidades de presión:

$$1 \text{ bar} = 1,02 \text{ kg/cm}^2 = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 101,325 \text{ kPa}$$

El pascal (Pa) = newton/metro²

Ejemplos

1. Determinar el porcentaje de víctimas mortales por hemorragia pulmonar en una explosión que nos origina una sobrepresión máxima de 120000 Pa.
 $Pr = -77,1 + 6,91 \ln P = -77,1 + 6,91 \ln 120000 = -77,1 + 6,91 \cdot 11,6952 = 3,7142$.
A un $Pr = 3,7142$ según tabla corresponde un porcentaje de afectados de 10%.
2. Determinar el porcentaje de afectados por rotura de tímpano en una explosión que nos origina una sobrepresión máxima de 43500 Pa.
 $Pr = -15,6 + 1,93 \ln P = -15,6 + 1,93 \ln 43500 = -15,6 + 1,93 \cdot 10,6805 = 5,0134$.
A un $Pr = 5,0134$ según tabla le corresponde un porcentaje de 50%.
3. Determinar el porcentaje de lesionados por:

1. Desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos
2. Hemorragia pulmonar
3. Rotura de tímpano

En una explosión de una nube de vapor no confinada que origina una sobrepresión de 1 bar y que tiene una duración de 80 milisegundos.

Tomando la ecuación de Eisenberg et al. (1975):

Solución

1º Lesiones por impacto.

Tomando la ecuación de Eisenberg et al. (1975)

$$Pr = -39,1 + 4,45 \ln J$$

J = impulso específico (Presión · tiempo)

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \quad 80 \text{ ms} = 0,08 \text{ s}$$

$$J = 10^5 \text{ Pa} \cdot 0,08 \text{ s} = 8000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$Pr = -39,1 + 4,45 \ln 8000 = -39,1 + 4,45 \cdot 8,9872 = -39,1 + 39,9930$$

$$Pr = 0,8930$$

Mediante tabla de transformación de «probits» a porcentajes corresponde 0%.

2º Lesiones pulmonares

Tomando la ecuación correspondiente de Eisenberg et al. (1975):

$$Pr = 77,1 + 6,91 \ln P$$

$$Pr = -77,1 + 6,91 \ln 100000 = -77,1 + 6,91 \cdot 11,5129$$

$$Pr = -77,1 + 79,5543 = 2,4543$$

Mediante la tabla de transformación de «probits» a porcentajes no llega a 1%.

3º Rotura de tímpanos

Tomando la ecuación correspondiente de Eisenberg et al. (1975):

$$Pr = -15,6 + 1,93 \ln P$$

$$Pr = -15,6 + 1,93 \ln 100000 = -15,6 + 1,93 \cdot 11,5129$$

$$Pr = -15,6 + 22,2199 = 6,61$$

Mediante la tabla de transformación corresponde 95%.

Si en vez de la deflagración de una nube de vapor hubiera ocurrido una explosión accidental de un explosivo industrial se hubieran tenido unas presiones muy superiores y unas consecuencias mucho más graves.

Bibliografía

(1) AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS
Guidelines for chemical process quantitative risk analysis
 Nueva York, American Institute of Chemical Engineers, 1989, 585 págs.

(2) LEES, F. P.
Loss prevention in the process industries
 Londres, Butterworths, 1980, 2 vols. 1316 págs.

(3) MOLAG, M.
Effects and damage calculations of accidents with hazardous materials

Lección del Curso: Estudios de Seguridad y Análisis de Riesgos en la Industria
Madrid, Instituto de Estudios de la Energía, - CIEMAT 1991, 26 págs.

(4) PIETERSEN, C. M.

Consequences of accidental releases of hazardous material

Lección del Curso: Estudios de Seguridad y Análisis de Riesgos en la Industria
Madrid, Instituto de Estudios de la Energía, - CIEMAT 1991, 18 págs.